



Title	Ultra-fast and high fidelity single-spin qubit operation
Author(s)	松本, 雄太
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/92163
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (松 本 雄 太)

論文題名

Ultra-fast and high fidelity single-spin qubit operation
(超高速で高忠実度な単一電子量子ビット操作)

論文内容の要旨

半導体量子ドット中の電子・スピン量子ビットは既存の半導体微細加工技術との親和性の高さから大規模集積化が期待され、最近ついに1,2量子ビットでは誤り訂正型量子コンピュータの要件を満たす操作忠実度(>99%)がSi量子ドットデバイスにおいて達成された。しかし集積化した構造で安定した高操作忠実度を実現することは未だ困難を極めており、デバイス構造や操作手法などさまざまな観点から操作忠実度の向上を目指した研究が活発化している。

Siデバイスでの1量子ビット操作は、微細磁石による傾斜磁場中で電子を振動させることによって有効磁場を印加することで行われる。近年ドット間のトンネルによって大きな有効磁場を電子に作用させる手法が提案、原理検証され、更に微細磁石の設計やトンネル結合や離調をより最適化することによって忠実度を最大化できることが期待されている。

私たちは、すべての同位体が核スピンを持ち99%以上の操作忠実度が達成されていないGaAsデバイスにおいて、多重量子ドット中のトンネル結合、エネルギーの離調を最適化することで高速かつ高忠実度な1スピン量子ビット操作を実現した。最大の操作速度としては271MHzを達成し、非常に強いスピン軌道相互作用による超高速操作が近年実証されたGeナノワイヤー系での値に匹敵する。また操作忠実度は高速なフィードバック制御や最適な操作パルスを用いることによって最大99.14%のクリフォードゲート忠実度、99.72%の $\pi/2$ ゲート忠実度を8.1 nsの π 回転速度で達成した。これは99%以上の操作忠実度を達成したSi,Ge系での値と比べて最も速く、全体の量子アルゴリズムの実行速度を向上させることも期待できる。また同一デバイスにおいて200MHzを超えるラビ周波数、99%以上の忠実度を実現した量子ドットの研究成果は未だかつてなく、多重量子ドットのトンネル結合と離調の制御による1スピン量子ビット操作が極めて有効であることが示唆される。

本研究での忠実度最適化は集積化した多重量子ドット配列内のパラメータ制御、ソフトウェア制御で完結することから新たな要素をデバイスに組み込む必要がなく、微細磁石によって操作するSiやスピン軌道相互作用を用いるGe量子ドットデバイスへ適応が可能なことから、将来の高忠実度な大規模量子ビット操作の重要な構成要素になることが期待される。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (松 本 雄 太)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 大岩 顕
	副 査	教授 松野 丈夫
	副 査	教授 越野 幹人
	副 査	准教授 藤田 高史
	副 査	上級研究員 (理研) 中島 峻

論文審査の結果の要旨

半導体量子ドット中の電子スピン量子ビットは既存の半導体微細加工技術との親和性の高さから大規模集積化が期待され、最近、1、2 量子ビットでは誤り訂正型量子コンピュータの要件を満たす操作忠実度(>99%)が Si 量子ドットデバイスにおいて達成された。しかし集積化した構造で安定した高操作忠実度を実現することは未だ困難であり、デバイス構造や量子状態操作手法などさまざまな観点から操作忠実度の向上を目指した基礎研究が活発化している。

Si デバイスでの 1 量子ビット操作は、微細磁石による傾斜磁場中で電子を振動させて生ずる有効磁場を印加することで行われる。近年ドット間のトンネルによって大きな有効磁場を電子に作用させる手法が提案、原理検証され、微細磁石の設計やトンネル結合や離調をより最適化することによって忠実度をさらに向上できることが期待されている。

松本氏は、すべての同位体が核スピンを持ち 99%以上の操作忠実度が困難と考えられていた GaAs 量子ドットにおいて、多重量子ドット中のトンネル結合とエネルギーの離調を最適化することで高速かつ高忠実度を両立する 1 スピン量子ビット操作を実現した。最大の操作速度としては 271MHz を達成し、非常に強いスピン軌道相互作用による超高速操作が近年実証された Ge ナノワイヤー系での値に匹敵する。また操作忠実度は、量子ビット周波数揺らぎに対する高速なフィードバック制御や最適な操作パルスを用いることによって最大 99.14%のクリフォードゲート忠実度、99.72%の $\pi/2$ ゲート忠実度を 8.1 ns の π 回転速度で達成した。これは 99%以上の操作忠実度が報告されている Si、Ge 系での値と比べて最も速く、量子アルゴリズム全体の実行速度を向上させることも期待できる。また同一デバイスにおいて 200MHz を超えるラビ周波数、99%以上の忠実度を実現した量子ドットの研究成果は未だかつてなく、多重量子ドットのトンネル結合と離調の制御による 1 スピン量子ビット操作が極めて有効であることが示唆される。

本研究で実現した忠実度最適化は、集積化した多重量子ドット配列内のパラメータ制御、ソフトウェア制御で完結することから新たな要素をデバイスに組み込む必要がなく、微細磁石によって操作する Si やスピン軌道相互作用を用いる Ge 量子ドットデバイスへ適応が可能なことから、将来の高忠実度な大規模量子ビット操作の重要な構成要素になることが期待される。

よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値のあるものと認める。